

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 以硫同位素探討恆星的核合成反應及元素的起源(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2112-M-032-013-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 10 月 31 日

執行單位：淡江大學物理系

計畫主持人：秦一男

計畫參與人員：秦一男、江羽婷、施政行

報告類型：完整報告

報告附件：國外研究心得報告

出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 6 月 28 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 以硫同位素探討恆星的核合成反應及元素的起源

Investigation of the Stellar Nucleosynthesis and  
Origin of Elements by Sulfur Isotopes

計畫類別： 個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC - 91 - 2112 - M - 032 - 013

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 10 月 31 日

計畫主持人：秦一男      einmann@astro.phys.tku.edu.tw

計畫參與人員：江羽婷、施政行

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：淡江大學物理系

中 華 民 國 九 十 二 年 十 一 月 十 七 日

# 以硫同位素探討恆星的核合成反應及元素的起源

## Investigation of the Stellar Nucleosynthesis and Origin of Elements by Sulfur Isotopes

計畫編號：NSC 90-2112-M-032-006

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 10 月 31 日

主持人：秦一男 淡江大學物理系 einmann@astro.phys.tku.edu.tw

計畫參與人員：江羽婷、施政行 淡江大學物理系

### 一、中文摘要

自然界中除了極少數原子序小的化學元素及其同位素(如氫、氦、鋰、鈹)是在大霹靂(Big Bang)時便形成外,絕大多數都是因為星球為維持其能量來源,經由核融合反應所合成的。這當中最重要,但也被最完整探索的,大概就是碳、氮、氧這三個元素了;一方面因為它們在宇宙間的含量僅次於氫與氦,另一方面也因為它們與生命的形成與演化有著密不可分的關係。因為觀測靈敏度的限制,前者才是造成研究對象侷限於此的原因。此外,定性上天文學家雖然已能解釋大部分元素的核合成反應,但在定量上卻仍存在很多疑點。即使是那些似乎已被了解的元素及其同位素,在近年來也因為觀測靈敏度的提高,新的觀測證據出現而有所修正;例如,我們之前的研究工作便對氮十五的形成提出新的觀點。為了擴大這方面的研究工作,並真正了解元素的形成及它們與星際化學、生物化學間的關係,本計劃希望能針對硫及其同位素 – 另一個不論在星際間含量或生命形成的過程中都十分重要的元素 – 的含量與起源做有系統的研究。而且,基於之前在研究氮十五時的經驗,我們的觀測對象不但包括本銀河系內的分子雲,也將納入大小麥哲倫星系內的天體。而這方面的研究將對瞭解星球內核合成反應的細節與星際介質內的“化學演化”有十分重要的貢獻。

**關鍵詞：**核合成反應、同位素含量、化學演化、銀河系、大小麥哲倫星系

### Abstract

It is clear that most of the elements (except of a few which were formed soon after the Big Bang) are synthesized in the interior of stars. As the source of stellar energy, nuclear reactions lead to the formation of a great variety of elements and isotopes. Among all elements, carbon, nitrogen, and oxygen are probably the most important ones, not only because they are the most abundant elements in the universe behind hydrogen and helium, but also they play so important a roll in formation and evolution of life. The observation sensitivity, however, is actually the reason limiting the investigation of other elements and isotopes. Recently, the improvement of instruments has opened the possibility to verify the nucleosynthesis model.

In this project, we intend to lead a systematic investigation of another important element – sulfur – and its isotopes. Sulfur is one of the most abundant elements in the universe behind H, He, C, N, and O. Although being less rich than silicon in space, sulfur plays more important a role in both interstellar chemistry and biochemistry. It is thus interesting for us to study its formation and evolution. According to our previous experience with the  $^{15}\text{N}$  study, we will not only observe molecular clouds in different part of our Milky Way, but also include data gathering from the Magellanic Clouds. This study will definitely provide us a new view of stellar nucleosynthesis and “chemical evolution” in interstellar medium.

**Keywords:** Nucleosynthesis; Isotope Abundance; Chemical Evolution; Milky Way; Magellanic Clouds

### 二、計畫緣由與目的

#### 2.1. 星球內的核合成反應 (Stellar Nucleosynthesis)

自然界中除了極少數原子序小的化學元素及其同位素(如氫、氦、鋰、鈹)是在大霹靂(Big Bang)時便形成外,絕大多數都是因為星球為維持其能量來源,經由核融合反應所合成的(e.g., Wilson & Rood 1994; Timmes *et al.* 1995)。因此,元素及同位素含量的精密測量對瞭解星球內的核合成反應,乃至於恆星的內部結構是很重要的。

傳統的光學天文學研究雖然可以藉由光譜分析來了解恆星或星際介質內的元素含量,但這個頻譜內的電磁輻射主要是來自於原子內電子的能階躍遷;因此,我們只能量測恆星附近星際介質內的元素豐度(緻密分子雲內的溫度太低,無法將電子激發到較高能階),而且不能分辨同一元素的同位素。電波天文學的研究恰好可以彌補這方面的缺憾:在分米及毫米波的範圍,天文學家主要觀測的是分子轉動的能階躍遷,其激發溫度僅在宇宙背景輻射附近,而且因為放射譜線的能量取決於分子的轉動慣量,可以毫無困難的分辨不同的同位素。除此之外,無線電波的散射截面遠小於可見光,在觀測上有助於我們探索緻密星際介質的中心。

在探測分子雲內元素或同位素含量時,分米及毫米波範圍的觀測雖然具有上述的優點,但這方面的研究卻是從約二十幾年前開始才比較活躍,而

且，也多僅限於少數幾種元素的同位素，如碳、氮、氧等，這主要肇因於儀器方面的限制(e.g., Wilson & Matteucci 1992; Wilson & Rood 1994; Kahane 1995)。這幾年來微波工程的進步大大提升了毫米波望遠鏡的靈敏度，一方面讓天文學家們有機會再次檢討早期的觀測結果，另一方面也讓我們有機會將研究領域延伸到其他元素及同位素。例如，因為觀測靈敏度的提升，我們之前的研究工作重新對氮十五( $^{15}\text{N}$ )的形成提出新的觀點(Chin *et al.* 1999)。這些結果不但告訴我們，在某種程度上必需檢討過去的結論；另一方面，我們也應將觸角伸到其他元素與同位素。尤其是後者，對我們真正了解星球內的核合成反應是不可或缺的。原因可就兩方面來說：

- **同一種反應的不同產物 (different products of the same reaction)**

恆星為了維持其光與熱，內部不斷的進行一些核融合反應：這包含主序星內的氫燃燒(hydrogen burning)、紅巨星內的氦燃燒(helium burning)、碳氧燃燒(carbon & oxygen burning)、矽燃燒(silicon burning)等；每一類的燃燒都包含為數眾多的反應，當然也就擁有龐大的產物。因此，一個好的恆星模型必定要能同時解釋各個核種彼此間的含量比；也就是說，唯有透過廣泛的觀測各種同位素的含量，才有機會真正鑑別理論模型的適用與否。

- **不同的核合成反應 (different reactions)**

因為參與燃燒的核反應數量龐大，而且在恆星演化的每個階段都有不同的反應在進行著，其所產生的核種也都不盡相同。因此，若要徹底了解各式各樣的星球核合成反應，我們必須將所有同位素所參與的反應，以及其產物都列為研究的對象。

## 2.2. “初級核種” (Primary Species) 與 “次級核種” (Secondary Species)

如前所述，天文學家雖然已能在定性上解釋大部分元素的核合成反應，但在定量上卻仍存在很多疑點。即使是那些似乎已被了解的元素或同位素，在近年來也因為觀測靈敏度的提高，新的觀測證據出現而有所修正。為簡化為數眾多的同位素核種及相關的原子核反應，以得到較清楚的圖像，我們將這些同位素分為兩大類，即“初級核種”與“次級核種”：

- **初級核種 (primary species)**

這類的同位素多是在大質量星球(壽命較短)的內部合成，甚至可以在第一代星球內部由含有初始同位素豐度(primordial abundances)的物質(即儘含氫、氦、鋰、鉍等元素)直接形成，因此可以在宇宙早期便出現在星際空間。

- **次級核種 (secondary species)**

這類的同位素或是在低質量星球(壽命較長)的內部合成，或是需要其他非初始同位素作為“燃料”，因此出現在星際空間的時間較“初級核種”為晚。

要注意的是，所謂“初級核種”或“次級核種”只是一種相對的概念，同一個核種可能較一同位素

“初級”，而較另一同位素“次級”；換句話說，星球內的核反應如此複雜，同一個核種的形成機制中可能包含了“初級”與“次級”的部分。較簡單而且在觀測上最直接的方法是：由測量同位素相對豐度隨著“金屬含量”(metallicity)的變化來決定兩同位素何者為“初級”，何者為“次級”。這方面的研究對瞭解星球內的核合成反應的細節與星際介質內的“化學演化”有十分重要的貢獻。

以氮的兩個同位素 –  $^{14}\text{N}$  及  $^{15}\text{N}$  – 為例，長久以來多數的天文學家都認為  $^{14}\text{N}$  為“初級核種”而  $^{15}\text{N}$  為“次級核種”，這個結論是根據本銀河系內  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  的測量而來的。但一方面其測量誤差很大，另一方面在整個銀河系盤面上“金屬含量”的變化不夠明顯。我們透過對大麥哲倫星系的  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  觀測，得以扭轉之前的認知： $^{15}\text{N}$  才是氮同位素內的“初級核種”，或至少是有相當程度的  $^{15}\text{N}$  是在宇宙早期便形成的 (參閱 Chin *et al.* 1999)。

根據過去對碳、氮、氧等元素及其同位素的觀測結果，已經有不同的研究團隊發表不同的理論模型，試圖利用已知的星球核反應數據，配合電腦模擬來解釋本銀河系內的“化學演化” (Matteucci & François 1989; Chin 1995)。這些模型所根據的不外乎是原子核的反應速率(包括實驗室內的測量與原子核物理的理論計算)，配合恆星的理論模型，所架構出來的星球演化模型，以此推測恆星在演化的最終階段所能釋放回星際空間的核種及其含量。但因為觀測上的限制，我們所能得到的訊息十分有限，在作電腦模擬時常常是可調的參數太多，而實際上的觀測值太少。本計劃希望能增加所觀測的核種，便是試圖在不增加參數的情形下，為理論模型提供更多來自觀測上的限制 (observational constraints)。

## 2.3 硫 (Sulfur) 與其同位素

我們對星球理論的研究已經了解，低質量主序星的能量主要來自質子-質子連鎖反應(proton-proton chain)，其主要產物為氦 ( $^4\text{He}$ )，但在大質量主序星內的碳氮氧循環(CNO cycle)，以及紅巨星階段內的氦燃燒(helium burning)反應則分別合成大量的氮 ( $^{14}\text{N}$ )及碳 ( $^{12}\text{C}$ )、氧 ( $^{16}\text{O}$ )等元素。因此，除了氫與氦是從宇宙一誕生便已經存在的元素，碳、氮、氧等便成為自然界中最早透過星球內部的核融合反應所形成的元素，也就是所謂的“初級核種”；他們也自然而然的成為含量最豐富的元素。

碳、氮、氧等元素因為含量豐富，尤其是藉由他們所形成的分子，也都是構成分子雲的主要成分，如一氧化碳 ( $\text{CO}$ )、氨 ( $\text{NH}_3$ )、水 ( $\text{H}_2\text{O}$ )等等，比較適合於電波望遠鏡的觀測，因此早期的研究幾乎都集中於此 (e.g., Wilson & Rood 1994)。矽的含量僅次於這些元素，但受限於它本身的化學性質，所形成的都是一些具有岩石屬性的化合物。而少數處於氣態的矽化合物多半是因為環境特殊，如在衝擊波(shock wave)的激發下將星際微塵的二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )氣化而成，因此不利於觀測。

在自然界當中，硫在含量上僅次於氫、氦、碳、氮、氧及矽，並擁有四種穩定的同位素： $^{32}\text{S}$ 、

$^{33}\text{S}$ 、 $^{34}\text{S}$ 、 $^{36}\text{S}$ ，其含量在太陽系內所佔的比例約為 95.02% : 0.75% : 4.21% : 0.021% (Anders & Grevesse 1989)。這四種同位素都可藉由氧燃燒 (oxygen burning) 的反應來合成；除此之外， $^{36}\text{S}$  還可能在超新星爆炸時的大中子流環境下，透過中子快速反應 (r-process) 而形成。因此，有別於氫、碳、氮等元素，對硫及其同位素的研究可以提供我們在大質量恆星演化晚期時，星球內部核合成反應的訊息。在觀測上，分子雲內存在著大量含硫的分子，這對電波天文學的觀測，尤其是分辨不同的同位素時，幫助很大，這和硫原子的化學性質有關。值得一提的是：也正由於硫具有這樣的化學特性，使得它不僅是在天文化學上，甚至在生物化學的領域中，都有不可忽略的重要性。（硫是除了氫、碳、氮、氧外，唯一出現在必需氨基酸內的元素；地球上早期的生命，更可能是藉由硫化氫 –  $\text{HS}$  – 生存的。）

硫同位素的研究雖然具有上述的重要性，但因為前面所提到的觀測靈敏度問題，早期的研究都僅針對單一的天體，如 IRC +10 216 (Kahane *et al.* 1988)。一直到 1996 年我們才提出一份較為系統性的研究報告 (Chin *et al.* 1996)，其研究對象也僅止於含量較豐的三個同位素： $^{32}\text{S}$ 、 $^{33}\text{S}$ 、 $^{34}\text{S}$ ；但在此同時，我們也首度嘗試並偵測到  $^{36}\text{S}$  的存在，這同時也是在天文上第一次觀測到含  $^{36}\text{S}$  的分子 (Mauersberger *et al.* 1996)。雖然我們之前的工作已經獲得初步的成果，但進一步的研究仍然是必需的。因為：

1. 在觀測上我們利用一硫化碳分子 ( $\text{CS}$ ) 來分辨不同的同位素，也就是分別觀測  $^{12}\text{C}^{32}\text{S}$ 、 $^{13}\text{C}^{32}\text{S}$ 、 $^{12}\text{C}^{34}\text{S}$ 、 $^{12}\text{C}^{36}\text{S}$  的轉動能階躍遷。但因為主要的同位素 –  $^{12}\text{C}^{32}\text{S}$  – 在分子雲內的含量過高，其光學厚度 (optical depth) 太大，無法提供所需的訊息。因此，我們只能利用  $^{13}\text{C}^{32}\text{S}$  與  $^{12}\text{C}^{34}\text{S}$  的譜線強度比，並配合早期研究工作所測定的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  含量比來推測  $^{32}\text{S}$  與  $^{34}\text{S}$  的相對豐度。這畢竟是一種間接測量，誤差較大。
2. 我們雖然已經證實  $^{36}\text{S}$  的存在，並獲得  $^{34}\text{S}/^{36}\text{S} \approx 115 \pm 17$  的結果。一方面這個值和太陽系內的結果相去太多，另一方面我們的樣品數有限（僅八個分子雲）。因此，我們還需要更多的觀測真正求得所需的結論。

因此，更進一步而且有系統的觀測與研究分析是十分必需的。

### 三、結果與討論

如前所述，我們希望對硫及其同位素做有系統的分析，並對其合成的過程做深入的探討。這包含觀測及理論模型架構兩部份。第一年的計劃著重在觀測上，尤其是本銀河系內的觀測，計劃對本銀河系盤面上的分子雲，都能針對來自  $^{12}\text{C}^{32}\text{S}$ 、 $^{13}\text{C}^{32}\text{S}$ 、 $^{12}\text{C}^{34}\text{S}$ 、 $^{12}\text{C}^{36}\text{S}$ 、 $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$ 、 $^{12}\text{C}^{36}\text{S}$  的訊號做一次巡天觀測。這一部分我們將同時利用位於南北半球的 IRAM 30m 望遠鏡及 15m 望遠鏡 *SEST*。其中，IRAM 30m 望遠鏡主要用來觀測太陽附近及其外圍的分子雲，這些樣品多半位於北半球的天空中；而

*SEST* 則被用來觀測南半球的天體，尤其是本銀河系的中心。同時，為能及早了解輻射傳遞 (radiation transfer) 效應對本計劃的影響，我們也利用德國 Effelsberg 的 100m 來觀測部分樣本的低激發態躍遷。這方面的工作對本計劃的推展十分重要，在經費運用上還可以節省相當程度的旅費開銷。此外，為了能控制觀測過程中的系統誤差，我們也利用三座望遠鏡同時觀測位於赤道附近的天體，如獵戶座星雲。

這裡值得一提的是我們第一次觀測到來自  $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$  分子轉動能階躍遷的訊號。和最常見的  $\text{CS}$  分子 –  $^{12}\text{C}^{32}\text{S}$  – 比起來，因為兩個元素碳與硫都被含量較少的同位素所取代，其含量也就特別低，但其重要性也在此。在求取硫或碳的同位素含量比時， $^{12}\text{C}^{32}\text{S}$  分子的轉動能階譜線的光學厚度 (optical depth) 太大，並不能提供正比與同位素實際含量的正確結果。但藉由低光學厚度的  $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$  以及其他同位素取代的各種  $\text{CS}$  分子轉動能階譜線，我們可以不藉由任何假設，而直接求得正確的硫或碳的同位素含量比。

計劃的第二年除了著手於電腦模型的建立外，並同時延續第一年末完成的觀測。觀測部分除了加強本銀系內硫同位素含量比值的建立外，亦將目標延伸至麥哲倫星系，以做為化學演化模型中的對照組。所有的觀測結果請參閱附表 -。

### 四、計畫成果自評

本計劃所使用的望遠鏡與當初所提出的計劃雖然不盡相同，但在以觀測為主的研究上也是常發生的。重要的是，使用不同的儀器不會影響計劃的執行，甚至還因為特殊的設定而有加分的效果：原來計劃利用 SMT0 的 10m 望遠鏡來觀測部分樣本的高激發態躍遷，但臨時改為利用德國 Effelsberg 的 100m 來觀測部分樣本的低激發態躍遷。只要是不同的激發態躍遷，就有了解輻射傳遞 (radiation transfer) 效應的功能，且兩者的角分辨率亦相當。在此，低激發態躍遷還可能因為波長較長，較不受天後影響的優點。

日前在國際會議上，『元素的起源』被認為是天文學上幾個重要而未完全解決的問題之一，因為這不僅在天文學上是個有趣的問題，也因為這個課題和行星的形成，乃至於生命的起源，都有直接或間接的關係。本研究團隊在硫同位素的研究上將遠超越其他團隊，這對天文學家們進一步了解元素的起源有不可取代的重要性。事實上，我們已與德國、澳洲、美國、日本及智利的天文學家們建立了初步的合作關係，這對未來在其他領域的學術交流或國際合作都奠定了相當好的基礎。

這些年來，台灣不管是在業餘天文愛好的風氣，或是天文研究的工作上，都有十分大的進步 – 前者包括台北天文科學教育館，及各地中小學內天文觀測站的成立；後者包括中研院天文所的各項計劃，以及教育部追求卓越計劃內的天文與粒子物理學 – 兩者目前都需要大量的天文專業人才。本計劃所訓練的研究生將可繼續從事天文方面的研究工作，也能兼顧業餘天文工作上所需的獨立操作能

力，在畢業後必能為國內天文研究環境有所貢獻。

## 五、參考文獻

Anders, E. & Grevesse, N. 1989, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **53**, 197  
 Chin, Yi-nan, Henkel, C., Whiteoak, J.B., Langer, N., & Churchwell, E.B. 1996, *Astron. & Astrophys.* **305**, 960  
 Chin, Yi-nan, Henkel, C., Langer, N., & Mauersberger, R. 1999, *Astrophys. J. Lett.* **512**, L143  
 Kahane, C. 1995, in *Nuclei in Cosmos, Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nuclear Physics*

Kahane, C., Gomez-Gonzalez, J., Cernicharo, J., & Guélin, M. 1988, *Astron. & Astrophys.* **190**, 167  
 Matteucci, F., & François, P. 1989, *Mon. Not. R. Astro. Soc.* **239**, 885  
 Mauersberger, R., Henkel, C., Langer, N., & Chin, Yi-nan 1996, *Astron. & Astrophys. Lett.* **313**, L1  
 Timmes, F.X., Woosley, S.E., & Weaver, T.A. 1995, *Astrophys. J. Suppl.* **98**, 617  
 Wilson, T.L. & Matteucci, F. 1992, *Astron. & Astrophys. Rev.* **4**, 1  
 Wilson, T.L. & Rood, R.T. 1994, *Annual Rev. of Astron. & Astrophys.* **32**, 191

## 附表

表一：觀測數據  
 (a) 譜線強度

	D <sub>GC</sub>	<sup>12</sup> C/ <sup>13</sup> C	Error	<sup>12</sup> CS	Error	<sup>13</sup> CS	Error	C <sup>34</sup> S	Error	<sup>13</sup> C <sup>34</sup> S	Error	C <sup>33</sup> S	Error	C <sup>36</sup> S	Error
IRAS12326	7.1	61	19	70.8	0.17	6.21	0.04	11.8	0.09	0.362	0.01	4.14	0.03	0.099	0.01
<i>J</i> =2-1	7.1	61	19	46.9	0.15	3.04	0.04	7.13	0.07	0.124	0.01	2.21	0.40	<	0.10
IRAS15290	5.0	45	16	34.1	0.22	3.99	0.06	6.92	0.14			1.95	0.05	<	0.33
<i>J</i> =2-1	5.0	45	16	25.7	0.19	2.22	0.05	4.31	0.11			1.11	0.04	<	0.20
IRAS15408	6.5	56	18	54.3	0.41	3.20	0.05	5.0	0.11						
<i>J</i> =2-1	6.5	56	18	48.5	0.20	2.38	0.06	5.4	0.12						
IRAS15491	6.1	53	17	64.6	0.15	8.15	0.04	15.7	0.13	0.463	0.02	4.00	0.03	0.137	0.01
<i>J</i> =2-1	6.1	53	17	53.4	0.16	5.39	0.04	11.1	0.09	0.397	0.02	3.27	0.04	<	0.12
IRAS15520	6.2	54	17	99.6	0.28	18.6	0.09	31.2	0.10	1.390	0.02	10.20	0.06	0.215	0.02
<i>J</i> =2-1	6.2	54	17	49.7	0.47	8.04	0.08	15.2	0.09	0.585	0.02	4.77	0.06	0.106	0.01
IRAS15567	4.3	40	15	52.5	0.38	3.71	0.05	8.07	0.12	0.114	0.01	1.25	0.03	<	0.11
<i>J</i> =2-1	4.3	40	15	35.8	0.35	2.00	0.06	4.6	0.08	0.143	0.01	1.30	0.04	<	0.11
IRAS16065	5.3	47	16	60.9	0.30	8.51	0.06	17.0	0.14	0.475	0.02	3.29	0.05	<	0.33
<i>J</i> =2-1	5.3	47	16	39.6	0.22	4.55	0.06	10.0	0.10	0.321	0.02	2.97	0.06	<	0.12
IRAS16164	5.4	48	16	62.6	0.19	8.69	0.06	13.8	0.15						
<i>J</i> =2-1	5.4	48	16	45.0	0.17	5.46	0.06	10.6	0.10						
IRAS16172	5.6	50	17	99.0	0.31	16.1	0.08	28.9	0.10	1.07	0.02	8.57	0.04	0.181	0.02
<i>J</i> =2-1	5.6	50	17	91.1	0.44	11.90	0.07	22.9	0.08	0.860	0.02	7.43	0.05	0.139	0.02
IRAS16506	6.2	54	17	29.9	0.13	2.99	0.05	6.63	0.05						
<i>J</i> =2-1	6.2	54	17	25.1	0.10	2.18	0.04	4.92	0.05						
IRAS16562	7.0	60	19	104	0.19	8.18	0.05	17.8	0.06	0.359	0.01	4.01	0.02		
<i>J</i> =2-1	7.0	60	19	78.1	0.18	5.51	0.05	12.6	0.05	0.282	0.02	3.21	0.02		
IRAS17009	6.5	56	18			5.84	0.06	10.2	0.05						
<i>J</i> =2-1	6.5	56	18			4.13	0.05	9.09	0.05						
IRAS17059	6.1	53	17	35.7	0.12	4.44	0.04	11.7	0.06	0.436	0.02	2.97	0.03		
<i>J</i> =2-1	6.1	53	17	34.6	0.11	3.66	0.04	8.14	0.05	0.235	0.01	2.33	0.03		
IRAS17160	2.9	29	14	34.9	0.17	3.26	0.06	7.50	0.07	0.259	0.01	1.44	0.02		
<i>J</i> =2-1	2.9	29	14	34.2	0.18	2.81	0.05	5.54	0.07	0.191	0.01	1.51	0.06		
IRAS17233	7.8	66	20	72.6	0.35	11.4	0.06	21.1	0.11	1.23	0.02	5.55	0.06		
<i>J</i> =2-1	7.8	66	20	57.7	0.32	7.51	0.05	14.7	0.08	0.466	0.02	4.60	0.03		
IRAS17257	6.3	55	18	98.6	0.19	8.87	0.03	20.0	0.08	0.549	0.02	4.47	0.03		
<i>J</i> =2-1	6.3	55	18	77.7	0.16	6.34	0.03	13.7	0.06	0.497	0.02	3.39	0.03		
Orion-KL	9.0	75	21	289	1.48	12.2	0.13	27.8	0.27	0.677	0.02	9.34	0.94	0.271	0.06
<i>J</i> =2-1	9.0	75	21	125	0.48	4.63	0.06	11.3	0.11	0.116	0.01	3.12	0.07	<	0.24
M17SW	6.4	56	18	106	0.14	5.04	0.13	14.2	0.12	0.166	0.04	3.00	0.06	<	0.30
<i>J</i> =2-1	6.4	56	18	75.5	0.11	3.55	0.12	9.13	0.10	<	0.10	2.55	0.08	<	0.33
NGC6334A	7.0	60	19	133	0.49	18.8	0.09	35.6	0.15	1.24	0.02	11.2	0.26	0.227	0.01
<i>J</i> =2-1	7.0	60	19	103	0.31	11.0	0.07	21.8	0.05	0.702	0.02	6.90	0.09	0.191	0.02
NGC6334B	7.0	60	19	103	0.43	8.92	0.09	20.0	0.09	0.547	0.02	4.51	0.06	0.114	0.02
<i>J</i> =2-1	7.0	60	19	86.2	0.29	7.94	0.08	17.9	0.06	0.618	0.02	4.59	0.10	0.338	0.02

## (b) 同位素比

	$^{12}\text{CS}/^{13}\text{CS}$	Error	$^{13}\text{CS}/\text{C}^{34}\text{S}$	Error	$\text{C}^{34}\text{S}/\text{C}^{33}\text{S}$	Error	$^{13}\text{CS}/^{13}\text{C}^{34}\text{S}$	Error	$\text{C}^{34}\text{S}/^{13}\text{C}^{34}\text{S}$	Error	$\text{C}^{34}\text{S}/\text{C}^{36}\text{S}$	Error
IRAS12326	11.40	0.10	0.526	0.007	2.85	0.04	17.2	0.6	32.6	1.1	120	13
$J=2-1$	15.43	0.25	0.426	0.010	3.22	0.61	24.5	2.3	57.5	5.2	>	71
IRAS15290	8.55	0.18	0.577	0.020	3.55	0.16					>	21
$J=2-1$	11.58	0.35	0.515	0.025	3.90	0.24					>	22
IRAS15408	16.97	0.39	0.635	0.024								
$J=2-1$	20.38	0.60	0.442	0.021								
IRAS15491	7.93	0.06	0.519	0.007	3.93	0.06	17.6	0.8	33.9	1.7	115	9
$J=2-1$	9.91	0.10	0.486	0.008	3.40	0.07	13.6	0.8	28.0	1.6	>	93
IRAS15520	5.35	0.04	0.596	0.005	3.06	0.03	13.4	0.3	22.4	0.4	145	14
$J=2-1$	6.18	0.12	0.529	0.008	3.18	0.06	13.7	0.6	26.0	1.0	143	14
IRAS15567	14.15	0.29	0.460	0.013	6.46	0.25	32.5	3.3	70.8	7.3	>	73
$J=2-1$	17.90	0.71	0.439	0.021	3.50	0.17	14.0	1.4	31.9	2.8	>	41
IRAS16065	7.16	0.09	0.501	0.008	5.17	0.12	17.9	0.9	35.8	1.8	>	52
$J=2-1$	8.70	0.16	0.455	0.011	3.37	0.10	14.2	1.1	31.2	2.3	>	83
IRAS16164	7.20	0.07	0.630	0.011								
$J=2-1$	8.24	0.12	0.515	0.011								
IRAS16172	6.15	0.05	0.557	0.005	3.37	0.03	15.0	0.4	27.0	0.6	160	18
$J=2-1$	7.66	0.08	0.520	0.005	3.08	0.03	13.8	0.4	26.6	0.7	165	24
IRAS16506	10.00	0.21	0.451	0.011								
$J=2-1$	11.51	0.26	0.443	0.013								
IRAS16562	12.71	0.10	0.460	0.004	4.44	0.04	22.8	0.8	49.6	1.5		
$J=2-1$	14.17	0.16	0.437	0.006	3.92	0.04	19.5	1.6	44.7	3.3		
IRAS17009			0.573	0.009								
$J=2-1$			0.454	0.008								
IRAS17059	8.04	0.10	0.379	0.005	3.94	0.06	10.2	0.6	26.8	1.4		
$J=2-1$	9.45	0.13	0.450	0.008	3.50	0.07	15.6	0.8	34.6	1.7		
IRAS17160	10.71	0.25	0.435	0.012	5.21	0.12	12.6	0.7	29.0	1.4		
$J=2-1$	12.17	0.28	0.507	0.015	3.68	0.19	14.7	1.0	29.0	1.9		
IRAS17233	6.37	0.06	0.540	0.006	3.80	0.06	9.27	0.2	17.2	0.4		
$J=2-1$	7.68	0.09	0.511	0.006	3.19	0.04	16.1	0.8	31.5	1.5		
IRAS17257	11.12	0.06	0.444	0.003	4.47	0.05	16.2	0.6	36.4	1.5		
$J=2-1$	12.26	0.08	0.463	0.004	4.04	0.05	12.8	0.6	27.6	1.2		
Orion-KL	23.65	0.37	0.439	0.009	2.98	0.33	18.0	0.7	41.1	1.6	103	24
$J=2-1$	26.95	0.45	0.410	0.009	3.62	0.12	39.9	4.0	97.4	9.3	>	47
M17SW	21.03	0.57	0.355	0.012	4.73	0.13	30.4	8.1	85.5	21.3	>	47
$J=2-1$	21.27	0.75	0.389	0.017	3.58	0.15	>	36	>	91	>	28
NGC6334A	7.07	0.06	0.528	0.005	3.18	0.09	15.2	0.3	28.7	0.6	157	8
$J=2-1$	9.36	0.09	0.505	0.004	3.16	0.05	15.7	0.5	31.1	1.0	114	12
NGC6334B	11.55	0.16	0.446	0.007	4.43	0.08	16.3	0.8	36.6	1.5	175	32
$J=2-1$	10.86	0.15	0.444	0.006	3.90	0.10	12.8	0.5	29.0	1.0	53	3